

直流機整流火花エネルギーの実験的考察

その他（別言語等） のタイトル	An Experimental Study on the Commutator Sparking Energy in Electrical D-C Machines.
著者	鈴木 好夫, 松田 敏彦
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	36
ページ	201-210
発行年	1986-11-30
URL	http://hdl.handle.net/10258/1110

直流機整流火花エネルギーの実験的考察

鈴木 好 夫・松 田 敏 彦

An Experimental Study on the Commutator Sparking Energy in Electrical D-C Machines.

Yoshio SUZUKI and Toshihiko MATSUDA

Abstract

The commutation is one of the most important problem on d-c machines, and the commutator sparking is a principal phenomenon of bad commutation.

Previously, we have developed a measuring apparatus using microcomputer for the arc energy of all commutator sparks.

In the present work, with this measuring apparatus, it is experimented on the relationship between the arc energy of commutator spark and the Spark-Number of JEC-54 by eye measurement. Results of the experimental work are as follows :

- (1) Arc energy is almost proportional to $(S-1)^3$ in the case of positive-brush, where S is the Spark-number.
- (2) The occurrence number of spark increases according to the Spark-Number. It cannot be disregarded on calculation of the arc energy per one commutator revolution.
- (3) It seems possible to get the automatical judgement of the Spark-Number by comparing the magnitude of arc energy.

1. は じ め に

近年、直流機は高性能化・小型化が進み苛酷な運転状況で使用される機会が多くなっている。特に大型機では、無火花運転は困難な状況にあり、火花発生の許容限界とその判定に対する検討が求められている。直流機における整流火花は、ブラシ及び整流子の摩耗や荒損の主原因となり、最悪の場合にはフラッシュオーバを誘発する。

整流作用の良否は、主としてブラシ火花の有無としてあらわれ、その火花の程度の測定は、我国では JEC-54 による火花号数を基準として行なわれる。この火花号数は、視覚に忠実に表現したものといわれ、火花の大きさの表示記号についての付加説明があるが、各号数についての実害の程度などの説明はなされていない。従って、以前からより客観的かつ定量的な火花計測法の開発が望まれており、整流火花を実害の観点から再検討する必要があるといわれてきている¹⁾。

整流火花については、古くから数々の研究がなされてきている^{2)~7)}。特に、稲垣氏らは1961年に波高分析器による整流火花の分析を行い、整流火花の発生電圧の分布や火花エネルギー及び

摩耗などについて報告している³⁾。しかし、発生した全ての火花のエネルギーを測定し火花号数との対応について検討した例はみられないようである。

筆者らは、先に発生火花全数のアーク継続時間を測定しうる装置について報告した⁸⁾。本報告は、この装置を用い目測火花号数に対する火花アークエネルギーを測定し考察を行ったものである。その結果、ブラシ材質・ブラシ極性・および整流子回転速度などと、同一火花号数で測定される火花エネルギーの関係などの知見を得ている。特に、各号数に対応するアークエネルギーの相対値は、火花号数をSとすると、正ブラシでは $(S-1)^3$ にはほぼ比例するという極めて興味深い結果を得ている。これによると、火花号数5号以上の火花のエネルギーでは従来考えられていた火花エネルギー値より著るしく大きな値となり、JEC-54の「有害な火花」の項にある、有害な火花は火花号数5号以上とした説明によく対応した結果を得た。さらに、火花アークエネルギーが、ブラシ材質にかかわらず一定の範囲に実測されることに注目し、火花号数の自動判定実験をも試みている。

2. 整流火花アークエネルギーと測定方法

2.1 火花号数と整流火花アークエネルギー

直流機の整流状態（火花の発生の度合）を表わすのに、我国では一般に電気学会標準規格（JEC-54）の火花号数が使われている⁹⁾。JEC-54による火花号数とその発生の度合を図-1に示す。図中の火花表示には3種類の記号がある。これらは、例えばブラシに流れる電流を次第に増加させた場合、×は初めて目視できる程度の火花、＊は次にあらわれる比較的エネルギーの小さなアーク火花、＊はさらにエネルギーが数倍以上になったアーク火花に対応している。JEC-54の火花号数は、できるだけ視覚に忠

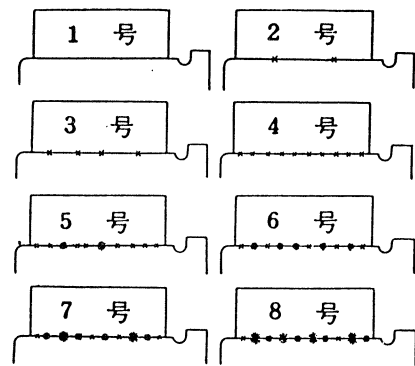


図-1 JEC-54の火花号数

実に表現していることに特徴があるとされている。しかし実際の目測では、火花の個数や大きさの基準にしてもあくまで目安にすぎず主観が入りやすい。また火花号数に対する具体的説明がなされておらず、運転状態や機械容量との関連なども全く不明である。また、現在のところ世界共通の火花評価基準もないため、IECにおいても懸案事項となっているといわれており、こうした状況から火花号数判定の客観化と実害の観点からのアークエネルギーを考慮した検討が望まれている¹⁾。

2.2 火花エネルギー測定原理

整流火花放電過程は、オシロスコープなどの観測によりその詳細が知られており、火花計測の対象量としても火花電圧降下が最も適している¹⁰⁾。

整流火花による実害と強く関係する一個の火花放電で消費されるエネルギー E_a を考える。

整流アークの放電電圧を v_a , 電流を i_a , その継続時間を t_a とすると、アークに消費されるエネルギーの基本式は次のようになる。

$$E_a = \int_0^{t_a} v_a i_a dt \quad (1)$$

ここに、 v_a は、放電期間中ほぼ一定値を示し、正ブラシでは12～13 V を、負ブラシでは19～22 V を示す場合が多い。従って、

$$v_a = V_a \approx \text{const.} \quad (2)$$

と置くことができる。また、アーク電流はアーク発生時の初期電流値 I_a より微小なアーク消滅電流値まではほぼ直線的に変化する。これより次式を得る。

$$i_a = I_a (1 - t/t_a), \quad 0 \leq t \leq t_a \quad (3)$$

従って(1)式は、

$$\begin{aligned} E_a &= V_a I_a \int_0^{t_a} (1 - t/t_a) dt \\ &= \frac{1}{2} V_a I_a t_a \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $I_a \approx V_a \cdot t_a / L$ とみなすことができるので

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_a^2}{L} \cdot t_a^2 \quad (5)$$

と表わされる。(5)式により、火花エネルギーは、火花継続時間とアーク放電電圧の2乗に比例することがわかる。

2.3 整流火花アークエネルギーの測定装置

前節の(5)式より、1個の火花エネルギーは、火花電圧 V_a , 整流インダクタンス L , 火花継続時間幅 t_a より求まる。火花継続時間 t_a は、既報の整流アーク継続時間測定装置が使用される⁸⁾。その測定原理は、整流火花アーク電圧波形の、クロックパルス計数式時間幅測定によるものである。本装置の特徴は、

- (1) 測定中に発生したすべての整流火花のアーク継続時間が測定できること、
- (2) 整流周期0.5msの最大回転速度で、整流アーク継続時間測定精度0.1 μ sの測定が可能になると

である。なお以下の測定では、アーク電圧 V_a を正ブラシでは12V を、負ブラシでは、19V の一定としてエネルギーを計算している。

図-2は、整流作用模擬装置の回路図である。ブラシ(B)の寸法は、 $10 \times 16 \times 32 \text{ mm}^3$ 、整流子(C)は、直径135mmで幅10mmの子片40枚で構成され、ブラシの子片被覆数は1である。整流子の奇数番号子片はスリップリングS1に、偶数番号子片はスリップリングS2に接続されている。

非整流インダクタンス L_a は、4.0mH で一定、整流インダクタンス L は、 $13 \mu\text{H}$ である。R は可変抵抗器であり、これによって電流を変化させ目測火花号数を決めている。また、整流子と同軸に回転同期信号を発生する回転角エンコーダが取り付けられており、最高速度は3000rpm まで測定可能である。

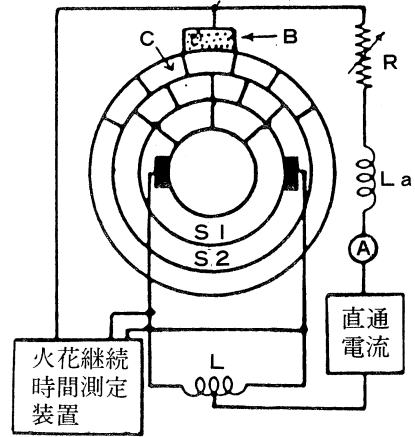


図-2 整流作用模擬装置の回路図

2.4 測定方法

供試ブラシは、スート系電気黒鉛で、比抵抗の異なる6品種を選んだ。それらの物理特性を表-1に示す。

測定方法は、まず供試ブラシのすり合わせを十分行った後に、5 A 小電流で約20時間の予備運転を行い、各火花号数に目測される火花発生の設定は、整流コイルインダクタンス L および回転数を一定とし、ブラシ電流を変化させて行った。

測定者の判定による目測火花号数の写真例を、図-3に示す。

表-1 供試ブラシの物理特性

材 質	略 号	見掛け比重	比 抵 抗 ($\mu\Omega - \text{cm}^2$)	かたさ (ショアー)	曲げ強さ (kg/cm^2)	接触電圧降下 (V)
電 気 黒 鉛	S-1	1.65	8500	40	120	1.4
	S-2	1.60	6400	48	140	1.1
	S-3	1.61	6000	48	170	1.2
	S-4	1.60	2800	44	230	1.0
	S-5	1.53	1700	27	130	0.85
	S-6	1.71	1100	46	400	1.1

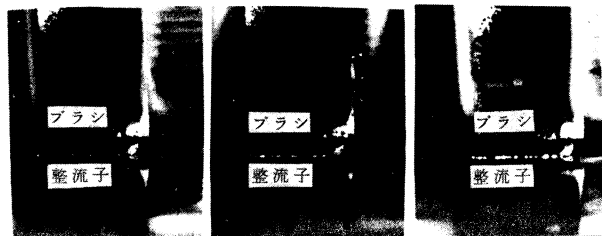


図-3 目測火花号数の写真例

測定は、整流子片の回転速度が1000rpm（周速約7.8m/s）と1500rpm（周速11.7m/s）の各場合について行い、ブラシの極性も正ブラシ、負ブラシについて行った。

マイクロコンピュータによるアーク継続時間の測定は、ブラシ後端と各整流子片との接触電圧パルスが10Vを越えるものすべてについて、10Vを越える時間幅を取り込む方式で行っている。

3. 測定結果と考察

1回の測定は、整流子300回転すなわち整流子片数=40×300=12000個における整流火花アーク（すなわち10Vを越える電圧パルスの全数）の各時間幅の測定からなっている。

これらの測定値は、火花総数、1回転当たりの平均火花発生数、アーク継続時間の平均値、1回転当たりの火花エネルギーなどの統計量として出力される。

表-2は、アークエネルギーの測定値である。

本測定による各火花号数に対するエネルギー値は、整流子300回転中に発生したすべての整流火花による整流子1回転当たりの平均エネルギー値であって、任意サンプル火花継続時間測定値からの算出ではない点に特徴がある。これにより、号数の大きい火花のエネルギーは、小号数火花のエネルギーに対する相対的大きさについて、これまでにいわれてきた値よりも1～2桁大きく測定され、火花の全数測定が、欠くことのできない条件であることが知られた。

表-2 アークエネルギーの測定値
(S-3 ブラシ, 1500rpm, 正極)

ブラシ品種 : S-3 火花号数 : 5
回転数 : 1,500 [rpm] 測定回転数 : 300
電流値 I : 8.7 [A]

継続時間区間幅	発生率〔%〕	火花発生数
1 ～ 2	35.7014	[1382]
2 ～ 3	14.2082	[550]
3 ～ 4	9.1966	[356]
4 ～ 5	6.5099	[252]
5 ～ 6	5.5800	[216]
6 ～ 7	4.4950	[174]
7 ～ 8	3.4875	[135]
8 ～ 9	2.9450	[114]
9 ～ 10	2.5575	[99]
10 ～ 11	1.8083	[70]
11 ～ 12	1.5758	[61]
12 ～ 13	1.6017	[62]
13 ～ 14	1.6017	[62]
14 ～ 15	1.4208	[55]
15 ～ 16	1.1108	[43]
16 ～ 17	1.2142	[47]
17 ～ 18	1.0850	[42]
18 ～ 19	0.5167	[20]
19 ～ 20	0.7233	[28]
20 ～ 21	0.3617	[14]
21 ～ 22	0.3617	[14]
22 ～ 23	0.3617	[14]
23 ～ 24	0.1292	[5]
24 ～	1.4467	[56]

総発生数 : 3871
一回転当たり発生数 : 12.90
平均時間幅 : 5.33717
仮想電圧 : 12.00
一回転当たりエネルギー : 0.0020357

3.1 目測火花号数と火花アークエネルギー

図-4に、ブラシ材質S-2について、ブラシ極性と回転数を変化させた場合の例を示す。横軸は、目測火花号数、縦軸は、1回転当たりの火花アークエネルギーである。

また、ブラシ品種S-1～S-6についての目測火花号数と火花アークエネルギーの測定結果を図-5に示す。

これらの測定結果より次のことが知られる。

- (1) 正極性及び負極性ブラシについて、目測により同一号数に判定された火花のエネルギー（整流子1回転当たりの値）を測定すると、負ブラシが正ブラシより約1桁大きい値を示し、その値は3号火花で $(0.5 \sim 1.0) \times 10^{-4} \text{ J}$ 、6号火花で $(10 \sim 100) \times 10^{-4} \text{ J}$ の値であった。

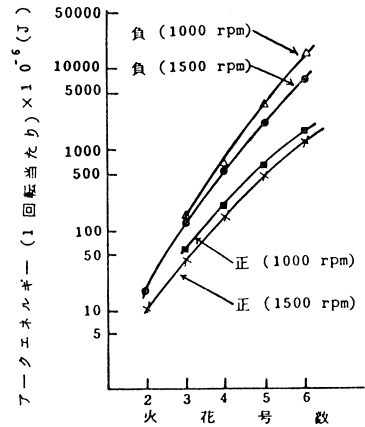
ブラシ極性差の原因としては、負ブラシは正ブラシに比して①放電電圧が高いこと、および②火花発生数（例えば、整流子1回転当たりの発生数）が多いことが考えられる。

- (2) 同一号数の火花について、供試6品種のブラシの火花エネルギーを測定した結果、ブラシ材質による差異は、約2倍程度で顕著なものではないと結論できる。
- (3) 火花号数が大きくなると、火花アークエネルギーは指数関数的に増大する。また火花号数が2号違うとエネルギー値は、ほぼ1ケタ異なる。

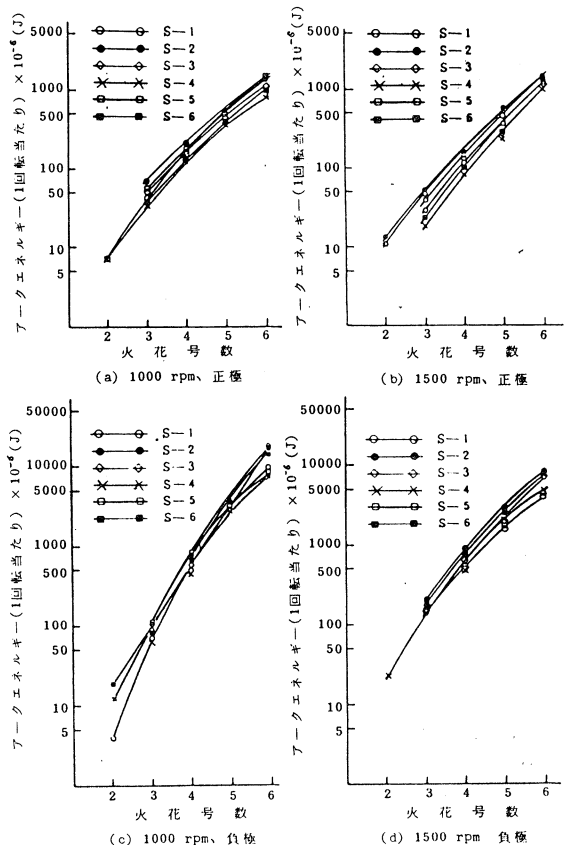
- (4) 整流子周速の違いによる火花アークエネルギーの変化は、周速が大きくなると火花アークエネルギーが高くなる傾向にあるが、大きな差は示さない。

3.2 目測火花号数と平均アーク継続時間幅及び発生数

図一6に、目測火花号数と平均アーク継続時間幅の関係を示す。この図より



図一4 ブラシ極性と回転数の違いによるアークエネルギー (S-2ブラシ)



図一5 目測火花号数と火花アークエネルギー

- (1) 火花号数が増えるにつれて平均アーク継続時間幅が大きくなっている。
- (2) 同一号数に測定される火花について、平均アーク継続時間の、ブラシ極性の違い、回転速度の大小による差異は少ない。
- (3) ブラシ材質について、一般に高い抵抗材質ブラシの平均アーク継続時間が小さい傾向が認められるが、顕著なものではない。

図一7に、目測火花号数と1回転当たりの火花発生数との関係を示す。回転数変化の効果は少ないが、ブラシ極性の違いの効果については、負ブラシの方が正ブラシに比べ、ほぼ倍近い発生数になっている。

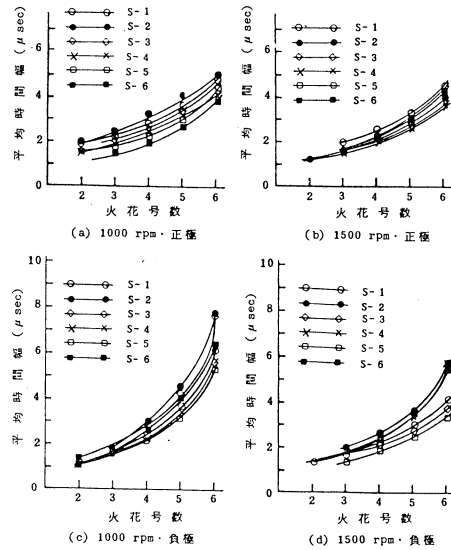
特に、負ブラシで5号火花以上になると、発生数が大幅に増大することが知られる。

3.3 火花号数と火花エネルギーの関係についての一考察

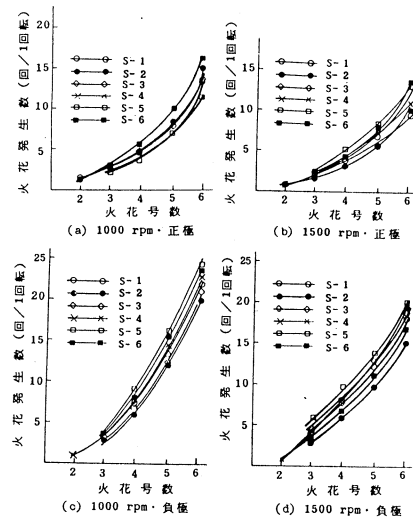
JEC-54の整流火花号数に対する火花エネルギーの相対的大きさについて、山村氏は次のような提案をしている²⁾。すなわち、表一1の火花号数図の火花表示の3種の記号とその個数に注目し、次のような仮定を設けて火花号数とそのエネルギーの関係を考察している。火花表示の3種の記号(×, *, *)は、×印は1, *は4, *印は8なる相対エネルギー強度をもつものと仮定し、各号数図にあらわれる各々の個数にこの相対エネルギー値を乗じて全エネルギーを計算した。その結果、各火花号数図の相対エネルギーは、Sを火花号数とし、2号火花のエネルギーを P_{ao} とおくと

$$P_a/P_{ao} = (S-1)^2$$

とよく一致していることを指摘している。



図一6 目測火花号数と平均アーク継続時間幅



図一7 目測火花号数と平均火花発生数

この相対エネルギー値は、アメリカの火花号数にみられる相対エネルギー値と対比されほぼ妥当なものであらうと考察されていた²⁾。

以上の火花号数の相対エネルギーを、前節の結果に示した測定値によって考察を試みる。

表－3 整流試験機による火花号数と相対火花エネルギー (1000rpm)

火花号数 S	アークエネルギー P_a/P_{ao}		$(S-1)^3$	一回転当り平均火花発生数	
	正	負		正	負
1	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1～2	1～2
3	6.6～10	7～10	8	2.2～3.5	2.5～4.5
4	18～29	30～45	27	4.0～5.2	6.5～10.8
5	57～78	200～260	64	6.2～9.0	13.3～17.1
6	128～157	460～600	125	11.0～16.0	18.4～23.5

表－3は、2号火花の、一回転当たりの平均アーク発生数と、2号火花のエネルギーを基準にし、3～6号火花の相対発生数及びエネルギー P_a/P_{ao} を示したものである。表の結果より、概ね次のことがいいうる。

- (1) 正ブラシの場合、相対エネルギー比 P_a/P_{ao} は、記号 S を火花号数とすると

$$P_a/P_{ao} = (S-1)^3 \quad (7)$$

によく一致する。しかし負ブラシになると4号火花までは、ほぼ $(S-1)^3$ に対応しているが、5号以上になると大きくずれる。このような表現については、ブラシ極性を区別した更に詳細な検討が必要であるが、特に5号以上の大きな火花発生時のアークエネルギーが、従来推測されていた値より著るしく大きいことが知られた。JEC-54の「有害な火花」の項に述べられている「有害な火花は、ほぼ5号以上」の記述を実証するものとみることができる。

- (2) JEC-54の火花号数と火花エネルギーの関係を明らかにするためには、機械容量やブラシ寸法効果と共に、火花表示記号の相対エネルギー値の検討が必要と考えられる。

4. 火花号数の自動判定の試み

前節に示したように、目測火花号数に対応する整流火花アークエネルギーがブラシ品種により大きな差異を示さずに、ある範囲の値になることに着目し火花号数の自動判定を試みた。

表－4は、火花号数自動判定のためのエネルギー値で、全供試ブラシによる各火花号数に対するエネルギーの下限値である。火花号数に対するエネルギー値は、回転数による差は小さいが、極数差が大きいために、自動判定は正、負ブラシ別々に行う必要がある。火花号数と火花アークエネルギーの関係は、正・負ブラシとも火花号数が2号増えるとほぼ一桁増加する。火花号数自

動判定の手順は、
火花アーク継続時
間のマイクロコン
ピュータ計測・記
憶終了後、測定値
から計算されたエ
ネルギー値と各号
数について設定し
たエネルギー区間
値を比較し号数を
判定し表示する。
実験では、目測火
花号数との比較を
行うため、測定開
始前に火花号数を
目測しておき、機
械測定結果と比較
した。

表-5 は、火花
号数の自動判定例
(品種 S-2, 正
ブラシ, 1000rpm)
である。

各号数ともよい

一致をみているので今後、実用機への適用を検討する予定である。

表-4 火花号数自動判定のためのエネルギー設定値

速度 (rpm)	極性	2号	3号	4号	5号	6号
1000	正	0.000005	0.000010	0.000100	0.000300	0.001000
1500	正	0.000010	0.000050	0.000100	0.000300	0.001000
1000	負	0.000010	0.000050	0.000200	0.002000	0.005000
1500	負	0.000010	0.000100	0.000500	0.001000	0.003000

表-5 火花号数の自動判定例 (S-2 ブラシ, 1000rpm, 正極)

総数: 386	平均: 1.29	時間幅: 1.60	エネルギー: 0.000018
目測火花号数 3	自動判定号数 3		
総数: 332	平均: 1.11	時間幅: 1.37	エネルギー: 0.000012
目測火花号数 3	自動判定号数 3		
総数: 255	平均: 0.85	時間幅: 1.36	エネルギー: 0.000009
目測火花号数 3	自動判定号数 2		
総数: 1233	平均: 4.11	時間幅: 2.39	エネルギー: 0.000130
目測火花号数 4	自動判定号数 4		
総数: 1491	平均: 4.97	時間幅: 2.55	エネルギー: 0.000178
目測火花号数 4	自動判定号数 4		
総数: 1491	平均: 4.97	時間幅: 2.45	エネルギー: 0.000165
目測火花号数 4	自動判定号数 4		
総数: 2097	平均: 6.99	時間幅: 3.77	エネルギー: 0.000550
目測火花号数 4	自動判定号数 4		
総数: 2298	平均: 7.66	時間幅: 3.60	エネルギー: 0.000550
目測火花号数 5	自動判定号数 5		
総数: 2132	平均: 7.11	時間幅: 3.97	エネルギー: 0.000621
目測火花号数 5	自動判定号数 5		
総数: 4366	平均: 14.55	時間幅: 7.00	エネルギー: 0.003950
目測火花号数 6	自動判定号数 6		
総数: 4483	平均: 14.94	時間幅: 6.95	エネルギー: 0.004002
目測火花号数 6	自動判定号数 6		
総数: 4207	平均: 14.02	時間幅: 6.97	エネルギー: 0.003768
目測火花号数 6	自動判定号数 6		

5. む す び

以上、整流火花の評価基準を検討するため、整流火花アーク継続時間測定装置により、JEC-54の火花号数と火花アークエネルギー、火花発生数などとの関係を測定し考察を行った。

その結果、次のような興味深い知見を得た。

- (1) 火花号数に対する火花アークエネルギーは、指数関数的に増加し、号数が2号異なるとエネルギー値はほぼ1ケタ異なる値となる。実験に用いた6種類のブラシについて、ブラシ材質及び整流子回転数の違いによる火花エネルギーの差異は、ほぼ10%程度である。し

かし、ブラシ極性が異なると大きく異なり、火花号数5,6号では負ブラシの火花エネルギーは、正ブラシよりも3~4倍大きな値となる。

- (2) 火花号数と火花エネルギーの関係を検討する場合、火花アーク発生数を考慮に入れる必要がある。本整流試験機による測定によると、正ブラシの整流火花号数に対する相対火花エネルギーの関係は、 S を火花号数として、 $(S-1)^3$ のエネルギー比となる測定結果を得た。

5号火花以上では、2号火花を基準とする相対的エネルギー値は、従来考えられていた推測値より10~20倍の値に測定された。JEC-54の有害な火花の項の、有害な火花とは「ほぼ火花号数5号以上」の記述を裏づけるデータと考えられる。

- (3) 発生火花の全数測定の結果、火花号数に対する相対火花エネルギー値を検討する場合、火花発生数(例えば、整流子1回転の発生数)を考慮に入れる必要があることが知られた。なお、今後実験の積み重ねとともに機械の容量及びブラシ寸法がどのような効果を生じるかの検討、さらに実機への適用についての検討などを進める予定である。

(昭和61年5月21日 受理)

参考文献

- 1) 高月一, 坪谷兼治: 電気学会雑誌, 100巻, 3号 (1980)
- 2) 稲垣純平: 電気学会雑誌, 84巻, 3号 (1964)
- 3) 稲垣純平, 他: 東芝レビュー, 16, 1131 (1966)
- 4) K. Binder: Elektrotech Z. (E.T.Z.)-A, 81, 558 (1960)
- 5) R. Holm: Pwr. Apparatus and Syst., No. 63, 588 (1962)
- 6) R. Holm: Trans Amer. Inst. Elect. Engrs, 67, 1124 (1958)
- 7) M. Turner, et al.: Proc. IEE, 113, 8, 1376 (1966)
- 8) 鈴木好夫, 他: 室工大研報. 35, 125 (1985)
- 9) 電気学会電気規格調査会標準規格, JEC-54 (1982)
- 10) 松田敏彦, 他: 室工大研報. 第6巻, 第3号 (1969)